12

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. Marcel DEPREZ,

INGÉNIEUR, LAURÉAT DE L'INSTITUT.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES,

SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,

Quai des Augustins, 55.

—

1880

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES.

Nouvel appareil de distribution à un seul tiroir, sans excentrique, à coulisse droite (1867).

Cet appareil emprunte son mouvement à la bielle motrice et à la crosse du piston; il imprime au tiroir un mouvement représenté par l'équation

$$x = A\cos\alpha + B\sin\alpha,$$

dans laquelle A est une constante et B une quantité sensiblement proportionnelle à la distance du coulisseau au-dessus du milieu de la coulisse. L'avance linéaire y est constante pour tous les degrés de détente. La coulisse est rectiligne. Présenté par M. Combes à l'Académie en 1867. Décrit dans le *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils* de la même année.

Recherches sur les mécanismes de distribution à un seul tiroir. Théorèmes et appareils nouveaux (1867-1869).

Une partie de ces théorèmes et des mécanismes qui en sont l'application sont décrits dans l'Ouvrage de M. Combes ayant pour titre *Études sur la distribution*. Ils ont été publiés *in extenso* dans le *Bulletin de la Société d'encouragement*. Le théorème principal de M. Deprez, dit *théorème des projections obliques*, permet de résoudre immédiatement toutes les questions de distribution à un seul tiroir, à avance con-

stante, beaucoup plus vite que le diagramme polaire de Zeuner. M. Deprez l'a matérialisé de plusieurs manières, en construisant des mécanismes de distribution très simples, dont les uns ne comportent qu'un excentrique et pas de coulisse, tandis que les autres, un peu plus complexes, permettent d'obtenir avec un seul tiroir une distribution satisfaisant à des conditions que les appareils à double tiroir paraissaient seuls capables de remplir (distribution elliptique); d'autres, enfin, n'ont ni excentrique ni coulisse.

Ces mécanismes ont été appliqués à un certain nombre de machines à vapeur, où ils ont donné de bons résultats économiques. Une machine locomotive de grande puissance, appartenant à la Compagnie du Nord et portant le n° 2430, a également été munie du mécanisme auquel M. Deprez a donné le nom de *système elliptique*. Elle a parcouru 30 000^{km}, pendant lesquels l'économie réalisée sur les autres machines du même type a dépassé 20 pour 100, résultat attesté par les rapports officiels des ingénieurs de la Compagnie.

Nouvel indicateur de pression (1868).

M. Deprez, ayant entrepris des expériences sur le travail de la vapeur dans les cylindres des locomotives, reconnut l'impossibilité d'obtenir des tracés utiles avec les indicateurs ordinaires, dont les courbes sont complètement déformées par les effets de l'inertie du piston et du ressort dynamométrique.

Il imagina un principe nouveau, qu'il nomma *principe de la rupture d'équilibre*, et qui consistait essentiellement à donner au ressort une tension initiale connue, le piston de l'indicateur étant maintenu entre deux arrêts qui ne lui permettent qu'un très petit mouvement. Lorsque la tension de la vapeur atteint une valeur égale à celle qui est représentée par la force élastique du ressort, il y a équilibro, et, si la tension de la vapeur continue à croître ou à décroître, l'équilibre est rompu et le piston trace un élément de la courbe du diagramme. En faisant varier la tension du ressort, on obtient ainsi une série de points qui forment un tracé continu. Cet appareil, essayé pour la première fois dans les ateliers de la Compagnie du chemin de fer de Lyon, a été présenté en

1871 à l'Académie par M. Combes. Il a été successivement perfectionné et modifié par M. Deprez, qui a fait à l'aide de cet instrument une série d'expériences sur les locomotives du chemin de fer du Nord, machines Crampton, Engerth, mixtes, machines express à roues couplées, dites *à outrance*, et machine 2430, munie du système de distribution de M. Deprez.

Instrument permettant d'obtenir, par une simple lecture, l'aire, le centre de gravité, le moment d'inertie d'une figure plane (1871).

M. Deprez découvrit, en 1871, une méthode générale permettant de réaliser matériellement, sans employer d'autres organes que des engrenages ordinaires, un mouvement représenté par une équation algébrique de degré m. Cette méthode est fondée sur le développement de $\sin^m x$ et $\cos^m x$ suivant une série dont les termes sont les sinus et les cosinus des multiples de x. Il montra que cette méthode permettait de résoudre immédiatement un grand nombre de problèmes de Cinématique pratique et l'appliqua aux mécanismes dont l'énumération suit :

1° *Intégrateur ou intégromètre*. — Le problème de la mesure de l'intégrale $\int y^m dx$ étant ramené à la construction d'une courbe dont les ordonnées sont proportionnelles à la puissance m des ordonnées d'une autre courbe et dont il ne reste plus qu'à mesurer l'aire, la méthode précédente s'applique immédiatement. M. Deprez imagina deux solutions, l'une constituant un instrument spécial qu'il nomme *intégromètre* et dans lequel se retrouvent des organes déjà employés dans le planimètre d'Amsler [1].

2° *Transformateur*. — Pour permettre aux personnes qui possèdent un planimètre polaire de l'utiliser, M. Deprez imagina le transforma-

[1] M. Amsler avait d'ailleurs imaginé et réalisé un intégrateur; mais, la description de cet appareil ne se trouvant dans aucun Recueil et aucune allusion n'ayant jamais été faite à son existence dans les nombreuses descriptions qui ont été publiées du planimètre polaire, *ni même dans les prospectus publiés en France par M. Amsler lui-même*, M. Deprez ignorait que M. Amsler eût construit un intégrateur. Ce fut M. le colonel Goulier qui l'avertit de ce fait en 1872 et lui communiqua une brochure allemande où l'intégrateur d'Amsler est effectivement décrit. L'instrument de M. Deprez est d'ailleurs plus simple.

teur, sorte de pantographe qui est composé de deux styles reliés entre eux par des engrenages. Si l'on décrit avec l'un d'eux une courbe *fermée*, le second trace une courbe dont l'aire est proportionnelle à $\int y^m dx$.

3° *Appareil à équilibre indifférent entre un ressort et un poids.* — Si l'on désigne par y les chemins parcourus verticalement par un poids et par x les chemins correspondants décrits par un point lié à un ressort dont les allongements sont proportionnels aux forces, l'équation du travail virtuel sera

$$p\,dy = f x\,dx,$$

f étant la force élastique pour un allongement égal à l'unité. En intégrant, on a

$$py = \frac{f x^2}{2} + C.$$

La constante peut être prise égale à zéro, et l'on voit que le problème est ramené à celui-ci : *Faire décrire à un point des chemins proportionnels aux carrés des chemins parcourus par un autre point.* Il rentre donc dans la classe des questions que la méthode de M. Deprez permet de résoudre immédiatement. La solution pratique est fort simple; trouvée en 1871, elle est décrite dans le *Traité de Mécanique* de M. Collignon, paru en 1872 (t. II, p. 397).

4° *Nouvelle suspension de voitures annulant complètement les cahots.* — M. Deprez montra que la question de la suspension des voitures complètement exemptes de cahots dépendait de la découverte d'un appareil à équilibre indifférent ou *presque indifférent* entre un poids et un ressort. Il n'eut qu'à appliquer le mécanisme précédent.

5° *Régulateur de vitesse astatique; indicateur de vitesse.* — Le problème du régulateur astatique dépend d'une équation du second degré. La méthode générale mène à une solution qui avait été trouvée déjà par Girard, en 1869, et qui comporte deux engrenages dans le rapport de 1 à 2.

Le problème de l'indicateur de vitesse à force centrifuge a été posé par M. Deprez dans les termes suivants : *Construire un pendule conique dans lequel les chemins parcourus par le manchon soient proportionnels à la vitesse angulaire.* Cette question dépend d'une équation du quatrième degré, que la méthode de M. Deprez permet de résoudre au

moyen de quatre roues dentées quand l'appareil ne comporte aucun ressort et de deux roues quand on admet l'emploi de ressorts.

Recherches sur l'influence de la distribution sur le rendement économique des machines à vapeur (1871).

Dans le cours de ses recherches géométriques sur la distribution, M. Deprez avait imaginé, comme cela a été dit plus haut, deux classes d'appareils : les uns, d'une grande simplicité, imprimant au tiroir un mouvement représenté par l'équation

$$x = A\cos\alpha + B\sin\alpha,$$

comme le font tous les appareils à coulisse; les autres (système elliptique, épicycloïdal, etc.) communiquant au tiroir un mouvement dont la loi est beaucoup plus compliquée, dans le but d'obtenir une ouverture et une fermeture rapides du tiroir, une faible compression et un faible échappement anticipé. Dans le système elliptique, par exemple, l'excentrique ou les excentriques qui mènent le tiroir sont animés d'un mouvement de rotation irrégulier, lié à celui de la manivelle motrice par la relation

$$\frac{\tang\alpha_1}{\tang\alpha} = k,$$

α_1 et α étant les angles décrits respectivement à partir du point mort par l'arbre auxiliaire qui porte les excentriques et par la manivelle motrice. La distribution ainsi obtenue satisfait à toutes les conditions qui ont toujours été considérées comme étant celles qui permettent d'obtenir de la vapeur le rendement économique maximum. M. Deprez fut amené à se demander si les appareils à coulisse (qui, pour les admissions faibles, n'ouvrent les lumières que d'une très petite quantité, produisent de fortes compressions et des échappements anticipés considérables) avaient, au point de vue économique, une infériorité aussi notable que le croyaient presque tous les ingénieurs. Il fit à cet égard des recherches approfondies, desquelles résulta la conclusion que les appareils à double tiroir ou à mouvement de déclic n'ont aucune

supériorité appréciable sur les appareils à tiroir simple. Ce travail fut publié deux ans plus tard, en 1873. M. Deprez y démontre un théorème important, dont voici l'énoncé :

Dans une machine à vapeur, lorsque la détente est complète (c'est-à-dire poussée jusqu'à la pression atmosphérique) et que la compression dans les espaces libres ramène la vapeur contenue dans le cylindre à la pression de la chaudière, le rendement de la machine n'est influencé ni par les espaces libres ni par l'admission anticipée, quelle que soit la loi de détente, pourvu qu'elle soit identique à la loi de compression.

Ce théorème est démontré avec une grande simplicité et sans faire aucune hypothèse autre que celle de l'identité des lois de détente et de compression.

Mais, si les distributions par coulisse n'affectent pas notablement le rendement économique, elles diminuent, en revanche, d'une façon souvent considérable, le travail développé par tour. Il résulte de là que, de deux machines ayant le même cylindre et munies l'une d'un système de distribution à coulisse, l'autre d'une distribution à tiroirs indépendants, la seconde pourra, *à travail égal par tour,* marcher à une détente plus élevée que la première et donner, par suite, un rendement économique plus considérable lorsque ce travail *par tour* sera exigé. C'est ce qui explique l'économie de près de 30 pour 100 réalisée par le système elliptique de M. Deprez sur une machine locomotive du chemin de fer du Nord.

Appareil destiné à enregistrer la loi des pressions des gaz de la poudre dans les bouches à feu (1872).

M. Deprez, ayant été mis en rapport avec le Service de l'inspection générale de l'artillerie de la marine, fut amené à proposer l'emploi de l'indicateur qu'il avait imaginé en 1869, pour les machines à vapeur, pour mesurer la pression des gaz de la poudre dans les canons. Il dut naturellement lui faire subir des modifications profondes, afin de le mettre à même de résister à l'intensité des forces mises en jeu et pour lui permettre de relever la courbe entière en un seul coup de canon.

Ses propositions furent agréées et le Ministre de la Marine décida, sur la proposition de M. le général Frébault, la construction de la *balance manométrique à dix pistons*.

Cet appareil consiste essentiellement en une capacité complètement remplie de mercure qui reçoit la pression des gaz de la poudre, diminuée dans le rapport de 1 à 100, grâce à des pistons de section convenable. Dix pistons poussés par des pressions connues et croissant en progression arithmétique viennent au contact du mercure et reçoivent de lui la pression des gaz de la poudre, diminuée dans le rapport de 1 à 100. Mais chacun d'eux, poussé contre son arrêt par une force connue, ne peut entrer en mouvement que lorsque la pression du mercure est au moins égale à cette force. Il suffit donc d'enregistrer le moment où l'un des pistons quitte son arrêt pour avoir un point de la courbe. Si l'on enregistre l'instant précis du départ de chaque piston sur un cylindre tournant, on aura dix points de la courbe des pressions en fonction du temps.

Cet appareil, dont le principe est si simple, présenta, quand il fallut enregistrer ses indications, des difficultés énormes et exigea de M. Deprez un travail continu de plusieurs années.

M. Deprez avait d'abord proposé de placer le cylindre tournant qui devait recevoir les indications des pistons sur l'appareil même, c'est-à-dire sur le canon. Les officiers d'artillerie déclarèrent qu'une telle solution était inacceptable et qu'il fallait avoir recours à l'enregistrement électrique. On crut que le chronographe à étincelle d'induction de M. Schultz pourrait atteindre le but; mais les recherches de M. Deprez démontrèrent que l'étincelle d'induction présentait des inconvénients tels, qu'il fallait y renoncer, et il dut chercher un autre moyen d'enregistrement.

Méthode nouvelle pour faire connaître exactement le moment où une force qui varie très rapidement passe par une valeur donnée (1872).

L'électricité permet de connaître exactement le moment où deux corps pressés l'un contre l'autre commencent à se séparer, par suite de la propriété dont jouit un courant électrique de cesser d'exister dès qu'il y a un intervalle appréciable (moins de $\frac{1}{100}$ de millimètre) entre

les surfaces par lesquelles il passe. M. Deprez a imaginé une méthode plus parfaite encore, en ce qu'elle n'exige *aucun mouvement* des corps soumis à l'action de la force que l'on veut mesurer. Elle fait connaître exactement le moment où il y a *cessation de pression* entre les deux corps. Voici en quoi elle consiste. Entre les deux surfaces pressées l'une contre l'autre est intercalée une petite lame de clinquant d'acier, ou même de papier, tirée par un petit ressort de caoutchouc dont la tension, quoique assez faible, est cependant égale à plusieurs milliers de fois le poids de la lame de clinquant et du ressort réunis. Cette tension est incapable de produire aucun mouvement de la lame lorsque les deux surfaces sont pressées l'une contre l'autre, à cause du frottement qui résulte de cette pression ; mais, dès que la pression cesse d'exister, la lame est entraînée par le ressort avec une rapidité extrême, et, quelque petit que soit l'intervalle de temps pendant lequel les corps ont cessé de se presser, il est accusé. Pour donner une idée de la rapidité de ce mouvement, il suffit de dire que, en donnant au caoutchouc une tension de 100^{gr}, on obtient facilement que le premier millimètre soit parcouru en $\frac{1}{5000}$ de seconde.

M. Deprez a donné à ce procédé le nom de *déclanchement par frottement* et l'a appliqué avec succès à un certain nombre d'appareils de recherche. Ce déclanchement a été décrit par M. le lieutenant-colonel Sebert, dans le *Mémorial de l'Artillerie de la Marine* [1].

Premières recherches sur l'étincelle d'induction et sur la vitesse d'aimantation et de désaimantation des électro-aimants (1872).

Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences (1874).

Quoique ces recherches soient plutôt du domaine de la Physique que de celui de la Mécanique, elles sont liées trop étroitement à plu-

(1) Il est bon de dire ici que toutes les recherches faites par M. Deprez pour l'inspection générale de l'artillerie de la marine ont été exposées dans le *Mémorial de l'Artillerie de la Marine* par les soins de M. le lieutenant-colonel Sebert, avec la collaboration duquel elles ont été faites presque toutes. Ces recherches ont d'ailleurs valu à M. Deprez d'être proposé deux fois pour la décoration par M. le général Frébault.

sieurs des travaux de Mécanique de M. Deprez pour être passées sous silence.

Il a été dit plus haut que, au moment d'employer le chronographe Schultz pour enregistrer les indications de la balance manométrique à dix pistons, M. Deprez avait dû étudier les conditions qui donnent naissance à l'étincelle d'induction, ainsi que son *retard*, c'est-à-dire l'intervalle de temps qui s'écoule entre le moment où le courant inducteur est rompu et le moment où l'étincelle éclate. Il employa pour cela une méthode fort simple, qui consiste à faire rompre le courant inducteur par le cylindre tournant sur lequel elle doit laisser sa trace. M. Deprez trouve ainsi que l'étincelle a un retard généralement inférieur à $\frac{1}{10000}$ de seconde, mais qu'elle a en revanche des déviations qui peuvent atteindre $\frac{1}{2}$ millimètre. Elle est, en outre, quelquefois multiple, c'est-à-dire accompagnée d'étincelles parasites; elle n'éclate que lorsque la rupture est faite d'une certaine façon, etc. En un mot, elle présente tant d'inconvénients, que M. Deprez dut étudier les deux autres moyens d'enregistrement électrique : les traces électro-chimiques et les électro-aimants. Il reconnut bien vite que les traces électro-chimiques, convenables pour la Télégraphie, étaient inadmissibles quand on veut les employer à mesurer le temps avec la précision exigée dans les études de Balistique intérieure. Restaient les électro-aimants. Ils avaient déjà été employés par des physiciens tels que Wheatstone, Regnault, et déclarés impropres à la mesure exacte des phénomènes très rapides, par suite de la lenteur avec laquelle se mouvaient leurs armatures et du temps qu'ils mettaient à s'aimanter et à se désaimanter. M. Deprez commença par isoler ces deux causes de retard, l'une purement mécanique et résultant de la petitesse du rapport de la force qui, dans les électro-aimants ordinaires, sollicite les organes mobiles, à la masse de ces mêmes organes; l'autre cause de retard, résultant du temps nécessaire à l'aimantation et à la désaimantation, est au contraire d'ordre physique. Ses recherches durèrent près de trois ans et eurent pour résultat la création de plusieurs types d'enregistreurs répondant à des besoins spéciaux. Le plus rapide d'entre eux permet d'obtenir 3300 signaux par seconde lorsque la fermeture et la rupture du courant sont employées chacune à produire un signal et 1600 signaux environ lorsque la rupture seule est utilisée. Dans ce dernier cas, la somme des re-

tards dus à la désaimantation et à l'inertie de la plume a pu être réduite à $\frac{1}{6250}$ de seconde, la vitesse de la plume au bout de ce temps si court dépassant 5^m par seconde.

Dans un autre type d'enregistreur analogue au système électro-magnétique employé dans le télégraphe Hugues, les signaux sont produits par des fermetures de courant, et l'on aura une idée de la rapidité de leur fonctionnement quand on saura qu'il suffit, pour les faire agir, d'un courant de 3^{él} Daniel fermé pendant le temps nécessaire à une balle de carabine rayée pour franchir moins de $0^m,01$.

A la suite de ces résultats, les enregistreurs de M. Deprez ont reçu un emploi de plus en plus général dans l'étude des phénomènes qui exigent une grande précision. Ils sont minutieusement décrits dans le *Mémorial de l'Artillerie de la Marine* et dans l'Ouvrage de M. le professeur Marey sur la *Méthode graphique*. Le dernier type n'a pas encore été publié.

Étude sur les régulateurs de vitesse. — Indicateurs de vitesse.

(Association française pour l'avancement des Sciences, sessions de 1873 et 1874.)

M. Deprez montra que la question de la régularisation de la vitesse des machines était loin d'être résolue par l'emploi des régulateurs isochrones ou astatiques, dans lesquels la question n'est traitée qu'au point de vue de l'équilibre statique. La seule condition qu'on leur impose, en effet, est celle-ci : faire en sorte qu'il y ait équilibre indifférent, dans toutes les positions possibles des boules, entre la force centrifuge et les forces auxiliaires qui les sollicitent et qui sont produites par des ressorts ou par des poids, *lorsque la vitesse angulaire a une valeur déterminée.*

On a imaginé un grand nombre de mécanismes remplissant cette condition; mais on a fini par s'apercevoir qu'elle n'assurait pas la régularité sur laquelle on comptait, parce que l'on avait oublié d'étudier de très près ce qui se passe quand l'équilibre vient à être rompu entre les forces motrices et les forces résistantes.

C'est là une des questions les plus difficiles de la Dynamique appliquée à l'étude des machines. M. Rolland a, le premier, abordé l'étude de cette question dans son Mémoire sur les régulateurs. M. Deprez,

par d'autres considérations, arriva aux mêmes conclusions que M. Rolland et montra que toutes les classes de régulateurs peuvent assurer, dans certains cas particuliers, un mouvement uniforme, mais ne peuvent, au contraire, que condamner la machine à des oscillations perpétuelles quand les conditions particulières mentionnées ne sont pas remplies (¹). Il fit connaître plusieurs indicateurs de vitesse, parmi lesquels on peut citer l'*indicateur à lame de ressort* et l'*indicateur à mouvement différentiel hélicoïdal.*

Indicateur à lame de ressort. — Un ressort est soulevé à chaque tour d'une roue par une came. Il tombe *sans vitesse initiale* sur un arrêt qui provoque la rupture d'un courant électrique traversant le gros fil d'une bobine d'induction. Le fil induit est en relation avec un tube de Geissler entraîné par la rotation de la roue et devient lumineux chaque fois que le courant inducteur est rompu par la chute du ressort. L'angle que fait cette ligne lumineuse avec une droite fixe choisie convenablement est proportionnel à la vitesse, puisqu'il représente l'espace angulaire décrit par la roue pendant un temps égal à la durée de chute du ressort. Une pinnule permet de lire cet angle. Cet appareil très simple fonctionne parfaitement. Il peut devenir inscripteur si l'on fait frapper la lame de ressort sur un crayon appliqué contre un cylindre lié à la roue.

L'*indicateur à mouvement différentiel hélicoïdal* est une des applications d'un organe nouveau imaginé par M. Deprez pour représenter les fonctions exponentielles; il se compose d'un plateau animé d'un mouvement uniforme et entraînant par adhérence une roulette dont l'axe fileté tourne dans un écrou qui reçoit le mouvement de rotation dont il faut mesurer la vitesse. Il est clair que la roulette ne peut rester à une distance constante du centre du plateau qu'à la condition d'être animée de la même vitesse angulaire que l'écrou; la vitesse relative de ces deux organes est alors nulle, et la roulette est animée d'un simple mouvement de rotation, non accompagné de translation suivant l'axe.

(¹) M. Deprez a étudié, il y a un an environ, un régulateur fondé sur un principe nouveau et qu'il fera connaître bientôt. Cet appareil n'est même pas mentionné dans le cours de cette Note. Il résout complètement la question, au moins au point de vue théorique, et ne saurait engendrer en aucun cas les oscillations de vitesse qui font le désespoir des praticiens.

Si l'on désigne par ω_1 la vitesse uniforme connue du plateau, par ω la vitesse angulaire à mesurer imprimée à l'écrou, par x la distance du point de contact de la roulette au centre du plateau et par r le rayon de la roulette, on a

$$\omega_1 x = \omega r,$$

d'où

$$\omega = \frac{\omega_1 x}{r} \quad \text{ou} \quad x = \frac{\omega}{\omega_1} r.$$

La roulette se place donc d'elle-même à une distance du centre proportionnelle à la vitesse qu'il s'agit de mesurer ([1]).

Appareil permettant d'engendrer mécaniquement la fonction logarithmique (1873-1874).

Si l'on suppose que, dans l'indicateur différentiel qui vient d'être décrit, l'écrou soit fixe, la roulette va tourner en se vissant dans l'écrou, et la relation qui existe entre les chemins parcourus par snn point de tangence sur le plateau et les angles décrits par le plateau est donnée par l'équation

$$\log \frac{x}{x_0} = \frac{c}{2\pi r} \alpha,$$

dans laquelle x et x_0 désignent les distances actuelle et initiale du point de contact de la roulette au centre du plateau, c le pas de la vis à laquelle est liée la roulette, r le rayon de la roulette et α l'angle décrit par le plateau.

Si l'on fait entraîner par le plateau une seconde roulette pour laquelle les quantités x, x_0, c et r seront respectivement remplacées par y, y_0, c' et r', on aura de même

$$\log \frac{y}{y_0} = \frac{c'}{2\pi r'} \alpha,$$

d'où, en éliminant α,

$$\frac{y}{y_0} = \left(\frac{x}{x_0}\right)^{\frac{rc'}{cr'}}$$

(1) Si les deux vitesses ω et ω_1 sont quelconques, l'instrument donne leur rapport par une simple lecture.

et, en posant $x_0 = 1$ et $\frac{rc'}{cr'} = m$,

$$y = y_0 x^m.$$

On a donc là un mécanisme très simple qui permet d'engendrer la fonction ax^m, et par suite tous les termes d'un polynôme de degré m. Cet instrument a été décrit par M. Deprez, ainsi que les indicateurs de vitesse, au Congrès de l'Association française pour l'avancement des Sciences, dans sa session de Lille, en 1874.

Théorème sur le choc des corps (1875).

M. Deprez a trouvé une construction graphique très simple qui donne immédiatement la grandeur et la direction de la vitesse de deux corps élastiques ou non, ou même d'élasticité imparfaite. Cette construction, fondée sur le théorème du mouvement du centre de gravité, remplace avantageusement les formules analytiques. Elle a été exposée au Congrès de l'Association française tenu à Nantes en 1875.

Invention d'un ensemble d'appareils permettant de relever à distance les diagrammes représentatifs du travail de la vapeur dans les cylindres des machines locomotives (1875).

Dans le cours de ses expériences sur les machines locomotives, M. Deprez avait été frappé de la difficulté de faire de bonnes observations, par suite de la situation très fatigante et quelquefois même dangereuse de l'expérimentateur. Il conçut alors l'idée de relever dans un wagon les diagrammes qui jusqu'alors avaient dû être pris directement sur les cylindres. Ses expériences et ses appareils de Balistique intérieure contenaient tous les éléments nécessaires pour résoudre la question. Il serait impossible de donner ici une idée, même superficielle, des méthodes et des appareils qu'il fut obligé d'imaginer. Mis en relation accidentellement avec l'ingénieur en chef de la Compagnie des chemins de fer de l'Est, il lui communiqua ses idées, le rendit témoin des expériences et lui montra les appareils qui démontraient la possibilité du problème posé. Ce fut là le point de départ de la con-

struction du wagon d'expériences de la Compagnie de l'Est, dont la conception appartient indubitablement à M. Deprez et dont la réalisation coûta près de trois ans de travail. Le wagon figura à l'Exposition universelle de 1878 et valut à M. Deprez une médaille d'or de collaborateur, qui lui fut décernée collectivement avec deux ingénieurs de la Compagnie. Ce wagon, véritable laboratoire ambulant, contenait une sorte de résumé des recherches de Physique et de Mécanique expérimentale faites par M. Deprez depuis 1872. Une des parties les plus curieuses de cet ensemble de mécanismes était l'appareil permettant de reproduire *rigoureusement* à distance le mouvement des pistons de la machine locomotive. M. Deprez a, depuis, trouvé une autre solution incomparablement plus simple, et qui permet de réduire le wagon d'expériences au volume d'une simple valise. Il n'a d'ailleurs reçu ni rémunération d'aucune sorte ni remercîments de la Compagnie, qui ne lui a même pas adressé la brochure descriptive du wagon, dans lequel son nom ne figurait pas.

Indicateur optique de vitesse (1875).

Congrès scientifique de Nantes.

En 1874, M. Deprez avait imaginé une méthode optique permettant de mesurer la vitesse des projectiles ou des bolides. Ce procédé fut l'objet d'une Note insérée aux *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*. En 1875, il modifia ce procédé pour l'appliquer à la mesure des vitesses de rotation. L'appareil se composait d'un petit miroir attaché à un ressort et recevant, à chaque tour de la roue dont on veut connaître la vitesse, une impulsion provoquée par le ressort (comme dans l'indicateur à lame de ressort déjà décrit). Le cylindre tournant porte aussi un petit miroir entraîné dans son mouvement de rotation. Les axes de ces deux miroirs sont perpendiculaires, et un rayon lumineux tombant successivement sur chacun d'eux se trouve animé finalement d'un mouvement angulaire résultant de leurs deux mouvements. La trace de ce rayon sur un plan est un élément de parabole qui vient couper une droite fixe à une distance d'une origine facile à déterminer, proportionnelle à la vitesse angulaire qu'il s'agit de mesurer.

Dynamomètre de traction (1876).

Congrès de Clermont.

Cet appareil a pour but de remplacer les dynamomètres à ressort par un simple pendule monté sur des couteaux et armé d'une poulie sur laquelle s'enroule un ruban d'acier auquel est appliquée la force à mesurer. En un point quelconque de la tige du pendule est fixée une tige horizontale assez longue, à laquelle est attaché le crayon. Si l'on désigne par P le poids du pendule ramené à son centre de gravité, par α l'angle avec la verticale de la droite qui joint les couteaux au centre de gravité, par r et l le rayon de la poulie et la distance aux couteaux du point d'attache de la tige porte-crayon, et enfin par L la distance des couteaux au centre de gravité, on a, pour la valeur f de la force à mesurer,

$$f = \frac{PL \sin\alpha}{r};$$

mais on a d'autre part, pour la valeur du déplacement x du crayon,

$$x = l \sin\alpha,$$

d'où l'on tire

$$f = \frac{PLx}{rl},$$

quantité proportionnelle à x.

Ainsi, dans cet appareil si simple, les chemins parcourus par le crayon sont rigoureusement proportionnels aux forces. De plus, la masse de la lentille et sa distance au point de suspension donnent au moment d'inertie une grande valeur et rendent l'instrument insensible aux petites variations accidentelles ou de caractère vibratoire de la force à mesurer. C'est là un avantage réel sur les appareils à ressort, et qui n'est pas acheté d'ailleurs au prix de l'exactitude des indications, comme on pourrait le croire d'abord [1].

---

[1] M. Deprez a démontré que l'influence de la masse du pendule n'entache d'aucune erreur la mesure de l'aire de la courbe du travail.

Appareils transmettant une vitesse constante malgré les variations de vitesse du moteur (1876).

Congrès de Clermont.

M. Deprez a réalisé deux sortes d'appareils de ce genre, l'un basé sur l'emploi d'un embrayage à friction et à force centrifuge, dans lequel la vitesse motrice doit toujours être supérieure à la vitesse transmise. Cet appareil est plus simple que le suivant, mais absorbe plus de force motrice, parce qu'il est, par son mode de fonctionnement même, soumis à des glissements *voulus* continuels.

Le second appareil imaginé par M. Deprez est basé sur l'emploi d'un organe nouveau, qu'il imagina également en 1876, et auquel il donna le nom de *servo-moteur cinématique*.

Servo-moteur cinématique.

Ce mécanisme a pour but de résoudre par des procédés purement cinématiques le problème résolu par M. Farcot en employant la vapeur ou un fluide quelconque comprimé.

Il se compose d'un cylindre ou d'un plateau auquel un moteur communique un mouvement de rotation. Contre ce cylindre, que nous supposerons horizontal, est appliquée avec une pression considérable uno roulette en acier à bords presque coupants, mais légèrement arrondis, dont l'axe de rotation est habituellement parallèle à l'axe du cylindre. Le montage de cette roulette est tel, que l'on peut la déplacer en ligne droite sur toute la longueur d'une génératrice du cylindre sans qu'elle cesse d'être entraînée par ce dernier. En outre, elle est montée comme les roulettes de fauteuil, c'est-à-dire mobile autour d'un axe vertical, avec cette différence toutefois, que *cet axe vertical passe par le point de contact de la roulette avec le cylindre*. Elle porte enfin une sorte de gouvernail semblable au gouvernail des petites voitures connues sous le nom de *tricycles*.

Cela posé, le cylindre étant animé d'un mouvement de rotation rapide, si l'on vient à imprimer au gouvernail un mouvement quelconque, la

roulette est déviée; mais cette déviation même fait naître entre elle et le cylindre un frottement parallèle à l'axe de ce dernier, et ce frottement tend à entraîner la roulette suivant une génératrice du cylindre avec une énergie qui dépend de sa pression contre lui. Ce mouvement d'entraînement a pour conséquence de redresser le gouvernail et cesse dès que l'axe de la roulette est redevenu parallèle à l'axe du cylindre.

Mais ce qu'il faut surtout remarquer, c'est que l'attirail lié à la roulette peut vaincre de grandes résistances pendant qu'elle se déplace parallèlement à l'axe du cylindre, et cela *sans exercer aucune réaction sur le gouvernail*. On peut donc avec cet appareil *faire suivre à un point soumis à des résistances passives considérables le mouvement d'un autre point sollicité par des forces très faibles*, et cela avec une rigueur absolue, le calcul montrant que la vitesse de translation de la roulette est toujours égale à celle de l'extrémité du gouvernail quand cette dernière est constante. On conçoit qu'un mécanisme de ce genre peut recevoir un grand nombre d'applications, parmi lesquelles on peut citer le totalisateur dynamométrique qui se trouvait dans le wagon d'expériences de la Compagnie de l'Est et le régulateur de vitesse transmettant une vitesse constante lorsque la vitesse initiale est variable, le servo-moteur ayant alors pour fonction de déplacer un galet de friction le long du rayon d'un plateau.

Appareil permettant de composer plusieurs mouvements sur un point. Application à l'indicateur de Watt (1877).

Congrès du Havre.

Dans tous les appareils destinés à recueillir des indications graphiques, le papier est animé d'un mouvement proportionnel à l'une des variables et le crayon d'un mouvement proportionnel à l'autre; chacun des éléments de la courbe tracée sur le papier peut donc être considéré comme représentant la résultante des mouvements élémentaires communiqués séparément au papier et au crayon. Dans certains cas particuliers, tels que l'indicateur de Watt, par exemple, il peut être avantageux de rendre le papier immobile et d'animer le crayon du mouvement résultant qu'il s'agit d'enregistrer. M. Deprez a montré que le pantographe résout la question. Si l'on désigne par A, B, C les trois points qui dans

un pantographe sont toujours en ligne droite, et que l'on imprime à deux d'entre eux A et B les mouvements à composer, le troisième C sera animé d'un mouvement élémentaire qui est une fonction du premier degré du mouvement des deux autres. Ce dispositif a été appliqué à un indicateur de Watt et a donné d'excellents résultats.

Il a été décrit dans les *Comptes rendus* de 1880.

Indicateur dynamométrique optique (1877).

Si, dans un indicateur de Watt muni d'un ressort dynamométrique très peu flexible, on remplace le crayon par un petit miroir recevant de la tige du piston de l'indicateur des mouvements angulaires d'une amplitude restreinte (6° à 7° au maximum), et que l'on fasse la même modification au tambour porte-papier, on aura un instrument composé de deux miroirs animés de mouvements angulaires très petits, mouvements que l'on pourra composer optiquement (comme dans les figures de Lissajous), et dont la résultante apparaîtra sous forme d'un trait lumineux dans une lunette ou sur un écran. Ce trait lumineux sera la courbe représentative des pressions successives de la vapeur dans le cylindre. On aura ainsi un moyen simple de connaître à chaque instant, d'un seul coup d'œil, les phénomènes qui s'accomplissent dans le cylindre. L'amplification pouvant être très considérable, le ressort pourra être très rigide et même remplacé par une membrane flexible, et les troubles résultant de l'inertie des pièces des autres indicateurs pourront être éliminés.

Moteur électrique à vitesse constante (1878).

Association française, Congrès de Paris.

Les moteurs électriques ont un poids et un volume qui, pour une puissance déterminée, les rendent très inférieurs aux autres moteurs. Guidé par des considérations fort simples, M. Deprez est parvenu à réaliser un moteur qui pèse moins de 3^{kg} et possède cependant une puissance suffisante pour faire marcher rapidement une forte machine à

coudre ou un tour de dimensions moyennes. Il suffit pour cela de 5 éléments Bunsen. Ce moteur est en outre réversible et permet d'obtenir un courant qui produit largement tous les effets que l'on obtient avec 2 éléments Bunsen. Il est composé d'un aimant permanent entre les branches duquel tourne une bobine Siemens dont l'axe est parallèle à l'aimant et occupe la moitié de la longueur de celui-ci. On utilise ainsi la puissance inductive de *presque tous les points* de l'aimant, tandis que jusqu'alors on *n'utilisait que les pôles*. Aussi cet appareil est-il, à poids égal, très supérieur à tous ceux du même genre. Il est, en outre, muni d'un régulateur de vitesse dont le mode d'action diffère totalement de celui des régulateurs astatiques.

Ce régulateur se compose d'une lame élastique, soumise à une tension considérable dirigée vers l'axe de rotation, par laquelle passe le courant électrique qui anime le moteur. Lorsque le courant est fermé, la bobine entre en mouvement, entraînant avec elle la lame électrique. La vitesse de rotation devenant de plus en plus grande, la force centrifuge développée dans la lame finit par faire équilibre à sa tension élastique, et à partir de ce moment la vitesse devient constante. En effet, si elle augmente infiniment peu, la lame s'écarte aussi infiniment peu de sa position normale et le courant est rompu; mais alors, le moteur n'étant plus soumis qu'à des forces résistantes, la vitesse diminue, et, comme il suffit d'une diminution infiniment petite pour ramener la lame dans sa position normale, le courant est refermé; la vitesse subit alors un nouvel accroissement infiniment petit, et ainsi de suite. On voit que la vitesse n'est pas rigoureusement constante dans le sens mathématique du mot, mais qu'elle oscille constamment entre deux limites extrêmement rapprochées, et, comme elle a une valeur absolue très grande (2000 tours par minute), les variations relatives sont absolument négligeables, d'autant plus qu'elles se répètent deux fois par tour, c'est-à-dire près de soixante-dix fois par seconde.

Les avantages de ce régulateur sur tous les autres sont évidents. Il est d'une extrême simplicité, n'exige aucune condition particulière concernant la distribution de la matière ou la forme de la lame, n'a aucun frottement et agit *instantanément* en parcourant un espace inférieur à $\frac{1}{10}$ de millimètre. Aussi les résultats obtenus sont-ils très beaux. Un moteur de ce genre ne donne pas de variation relative de vitesse at-

teignant $\frac{1}{500}$, et cela malgré toutes les variations possibles dans l'intensité du courant ou dans les résistances opposées au moteur.

Synchronisme électrique de deux mouvements de rotation ou d'un mouvement de rotation et d'un mouvement vibratoire (1878).

Société de Physique.

Si l'on supprime le commutateur d'un moteur de M. Deprez, et qu'on le remplace par deux frotteurs amenant simplement le courant dans les fils de la bobine, cette dernière prend une position d'équilibre vers laquelle elle revient avec une grande énergie si on l'en écarte; si l'on vient alors à renverser le courant, la bobine prend une nouvelle position d'équilibre; si enfin les alternances de courant se suivent assez rapidement au moyen d'un commutateur que l'on fait tourner, la bobine prend un mouvement de rotation tel, que le nombre de demi-tours qu'elle accomplit dans une seconde est précisément égal au nombre d'alternances du courant. Le sens de cette rotation est d'ailleurs quelconque et dépend de l'impulsion initiale. Le synchronisme se maintient *malgré les efforts moteurs ou résistants* que l'on applique au moteur, entre certaines limites, bien entendu, et, si les alternances, au lieu d'être produites par un commutateur tournant, sont produites par un diapason, la bobine prend un mouvement de rotation tel, que le nombre de tours accomplis pendant une seconde est *rigoureusement* égal au nombre de périodes du diapason. Or, comme ce dernier est animé d'un mouvement tellement régulier qu'on peut le prendre pour étalon du temps, on voit que le mouvement de rotation du moteur sera d'une régularité qu'on ne peut atteindre par aucun autre moyen.

Nouveau synchronisme électrique entre deux mouvements de rotation (1879).

Société de Physique. — Académie des Sciences, 1880.

Le procédé de synchronisme décrit précédemment avait le défaut d'exiger une impulsion initiale et de ne pouvoir tourner qu'à la condi-

tion que le nombre des alternances fût au moins de 20 par seconde. M. Deprez l'a perfectionné de manière que le synchronisme ait lieu pour toutes les vitesses comprises entre 0 et 40 tours par seconde. Cet appareil a fonctionné devant l'Académie. Il résout complètement une des questions les plus importantes du wagon d'expériences de la Compagnie de l'Est.

Nouveau frein dynamométrique se réglant automatiquement (1879).

C'est un frein de Prony, auquel M. Deprez a ajouté un levier revenant vers le centre de l'arbre et un poids appliqué à l'extrémité de ce levier, précisément dans le prolongement du centre. Ce levier est articulé par deux petites bielles aux mâchoires du frein. Il résulte de cette disposition que le serrage des mâchoires est nul quand le levier est vertical, et maximum quand il est horizontal. Ces variations de pression sont d'ailleurs produites sans aucun déplacement du poids qui les produit, à cause de la rigidité des pièces. Ce poids n'entre donc pas dans l'évaluation du travail. Quant au poids servant à évaluer le couple du frottement, il est suspendu à un ruban d'acier enroulé sur une poulie folle sur l'arbre et liée à l'ensemble des mâchoires, de façon que son moment soit constant. Si le coefficient de frottement des mâchoires sur l'arbre vient à éprouver des variations, l'inclinaison du levier de serrage varie d'elle-même jusqu'à ce que l'équilibre entre le moment du frottement et le moment du poids dynamométrique soit rétabli. Le travail transmis par tour est donc constant [1].

Mesureur d'énergie (1880).

Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences. — Société de Physique.

Cet instrument, dont le principe repose sur un théorème démontré par M. Deprez, a pour but de mesurer la quantité d'énergie qui traverse

[1] M. Carpentier a donné de ce problème, et postérieurement à M. Deprez, une solution toute différente, et fort élégante d'ailleurs, qui a été présentée à l'Académie.

un circuit électrique et qui se manifeste soit sous forme de chaleur, soit sous forme de décomposition chimique, soit enfin sous forme de travail dans un moteur électrique. Il ramène la mesure de la quantité d'énergie à celle du produit des intensités de deux courants, et ce produit peut être obtenu, par une simple lecture, au moyen d'un appareil auquel M. Deprez a donné plusieurs formes différentes. Cet appareil fait connaître, par exemple, immédiatement, le nombre de chevaux-vapeur absorbé par une lampe électrique. Il n'a pas de précédent.

Théorème sur le rendement économique des moteurs électriques (1880).

Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences.

M. Deprez établit un théorème fort simple qui permet d'évaluer immédiatement, et sans faire aucune mesure de travail ni aucune pesée de zinc, le rendement économique d'un moteur électrique. Il suffit, pour cela, d'un rhéostat et d'un galvanomètre. M. Deprez applique ce théorème au rendement des machines dynamo-électriques servant à transmettre à distance le travail d'un moteur et trouve qu'il peut être rendu indépendant de la distance. Il justifie ce résultat, paradoxal en apparence, par des faits parfaitement établis, relatifs au transport à distance de l'énergie chimique du courant.

Dans cette énumération, plusieurs travaux de M. Deprez ont été omis à dessein. Cependant il faut rappeler ici deux appareils, qui sont :

Accélérographe (1873-1874).

Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, 1874.

Cet instrument donne la loi du mouvement d'un piston poussé par les gaz de la poudre et surmonté d'une lourde masse qui ralentit son mou-

vement. Il fait connaitre la pression des gaz d'après l'accélération qu'ils impriment à la masse, d'où le nom d'*accélérographe*.

Tout l'appareil est placé sur la bouche à feu, et fonctionne parfaitement. Les premières courbes obtenues dans des conditions aussi extraordinaires ont été insérées aux *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*.

Chronographe électrique pour le service de l'artillerie de la marine.

Mémorial de l'Artillerie de la Marine.

Cet instrument, dû à la collaboration de MM. Deprez et Sebert, est le résumé des recherches faites par M. Deprez sur l'enregistrement électrique jusqu'en 1876. Il permet de mesurer les intervalles de temps successifs employés par un projectile pour franchir l'âme d'un canon, avec une approximation d'environ $\frac{1}{100000}$ de seconde.

Il est actuellement au Dépôt des poudres.

6143 PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS, QUAI DES AUGUSTINS, 55.